



Доклады ТСХА
Выпуск 293
Часть III

Москва 2021

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА

ДОКЛАДЫ ТСХА

ВЫПУСК 293

(ЧАСТЬ III)

Москва
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
2021

УДК 63(051.2)

ББК 40

Доклады ТСХА: Сборник статей. Выпуск 293. Часть III /
Коллектив авторов; Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва :
Издательство РГАУ–МСХА, 2021. – 580 с.

В сборник включены статьи по материалам докладов ученых РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, других вузов и научно-исследовательских учреждений на Международной научной конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 155-летию РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, которая проходила 2–4 декабря 2020 года.

Материалы представлены по актуальным проблемам: применения новых технологий и оборудования в системах электроснабжения предприятий; инноваций в теплотехнике, гидравлике и энергообеспечении предприятий и в транспортно-технологических машинах и комплексах; автотракторной техники, повышения эффективности использования технологических и транспортных систем; инновационных технологий в растениеводстве; прикладной механики; инновационных направлений развития системы технического сервиса в АПК; управления качеством и метрологического обеспечения в производственно-технологических системах АПК.

Сборник предназначен для студентов бакалавриата, магистратуры, аспирантов, преподавателей, научных работников, специалистов сельскохозяйственного производства.

Редакционная коллегия

Начальник управления научной деятельности к.п.н., доцент **Л.В. Верзунова**, ведущий инженер к.э.н., доцент **З.Ф. Садыкова**, заместитель директора по научной работе института механики и энергетики имени В.П. Горячкина, д.с.-х.н., доцент **А.А. Манохина**.

ISBN 978-5-9675-1835-5

© Коллектив авторов, 2021
© ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2021

УДК 621.314.263

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДЖ. К МАКСВЕЛЛА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Забудский Евгений Иванович, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени И.Ф.Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Аннотация. Разработан 3-фазный утроитель частоты для питания высокоскоростного электропривода, состоящий из 3-х одинаковых модулей. Исследовано распределение магнитного поля в пространственно-временном континууме, установлены рациональные соотношения размеров магнитной системы и приняты проектные решения, оптимизирующие устройство.

Ключевые слова: утроитель частоты, магнитное поле, метод конечных элементов, математическая модель, электропривод.

Разработан утроитель частоты, его активная часть состоит из магнитной системы и трехфазных совмещенной первичной обмотки (СО) и вторичной обмотки (Авт. свид. 1663721). Утроитель содержит 3 одинаковых модуля, связанных между собой гальванически. Модуль включает 3-стержневой магнитопровод и 5 катушек разных фаз СО и 3 катушки вторичной обмотки (рис. 1,а; катушки вторичной – не показаны). Каждая фаза СО состоит из 5 последовательно соединенных катушек, отношение чисел их витков составляет $w_M:w_C:w_B:w_C:w_M = 0,395:0,743:1:0,743:0,395$. Катушки с витками w_B и w_C являются основными, w_M – фазосдвигающими. Совмещенная обмотка выполняет функции двух обмоток: основной и фазосдвигающей. Принятые соотношения чисел витков катушек фаз СО, схема соединения катушек в фазе и расположение их на стержнях обуславливают создание симметричной 9-лучевой звезды векторов МДС стержней (рис. 1,б) и исключение из тока гармоник с номерами 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15. Это является существенно важным, так как утроитель работает на участке кривой намагничивания, расположенном за её «коленом». Устройство активной части обеспечивает выделение во вторичной обмотке третьей трёхфазной гармоники B_3 магнитного поля (рис. 1,б и 2,д). Существенная нелинейность устройства определяет необходимость анализа на основе теории электромагнитного поля.

Модель электромагнитного поля Максвелла (Maxwell) при введении векторного потенциала \mathbf{A} и калибровки Кулона аналитически преобразуется к векторному уравнению в частных производных, используемому для расчёта поля:

$$\nabla \times ((1/\mu_a) \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} - \gamma \partial \mathbf{A} / \partial t, \quad (1)$$

где ∇ – вектор-оператор; μ_a – магнитная проницаемость;

γ – удельная электропроводимость;

\mathbf{J} и $\gamma \partial \mathbf{A} / \partial t$ – векторы плотности тока проводимости и вихревого;

символ « \times » – знак операции векторного произведения [1].

Для решения (1) применен метод конечных элементов (КЭ). Согласно методу потенциал $A(x,y,t)$ аппроксимирован дискретной моделью (рис. 1,в,г) и сформирована система нелинейных алгебраических уравнений; решена методом Ньютона на ПК по программе относительно значений потенциала (Рег. № 94698, ОФАП НИИВО Минобразования РФ).

Результаты решения: 1) рассчитаны значения магнитной индукции B_x , B_y , B , напряженности H и проницаемости μ_a/μ_0 в КЭ на интервалах времени Δt ; 2) построены линии равного потенциала $A(x,y) = \text{const}$ / линии поля (рис. 2,а); 3) реализован поиск зон с максимальной индукцией; 4) построены зависимости $A = f(t)$, $B = f(t)$, $H = f(t)$ и $\mu_a/\mu_0 = f(t)$ для заданных КЭ и выполнен гармонический анализ (рис. 2,з,д); 5) построены двумерные поверхности $A = f(x,y)$, $B = f(x,y)$, $H = f(x,y)$ и $\mu_a/\mu_0 = f(x,y)$ (рис. 2,б,в); 6) установлены рациональные размеры магнитопровода; 7) приняты проектные решения, оптимизирующие активную часть утроителя частоты.

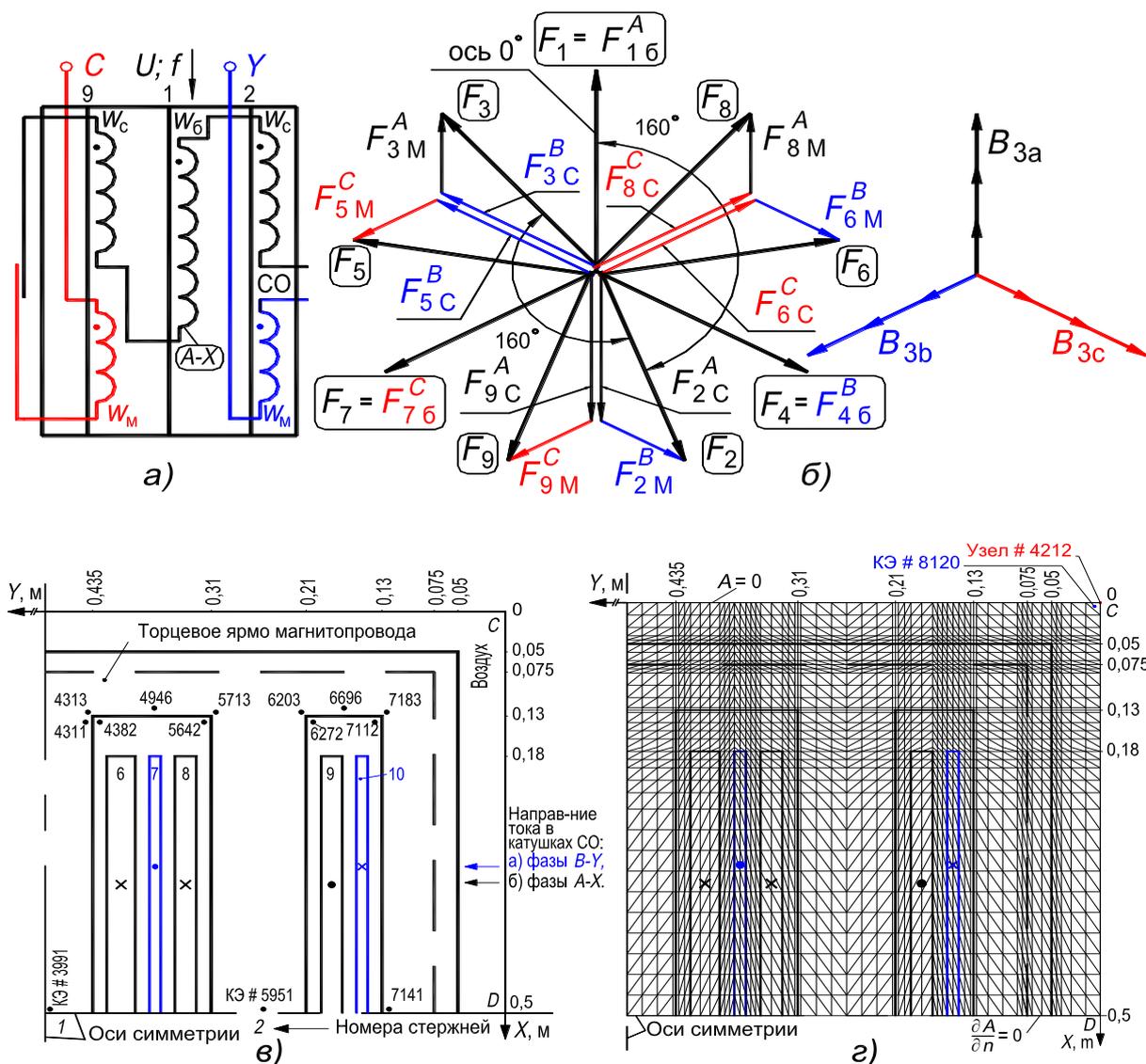


Рис.1. Утроитель частоты:

а) – схема модуля; б) – звезды векторов МДС и индукции; в) – область расчёта (1/4-я); г) – ансамбль КЭ

На рис. 1 представлены схема модуля утроителя, звезды векторов, область расчёта поля и ансамбль КЭ. На рис. 2 – результаты расчёта поля.

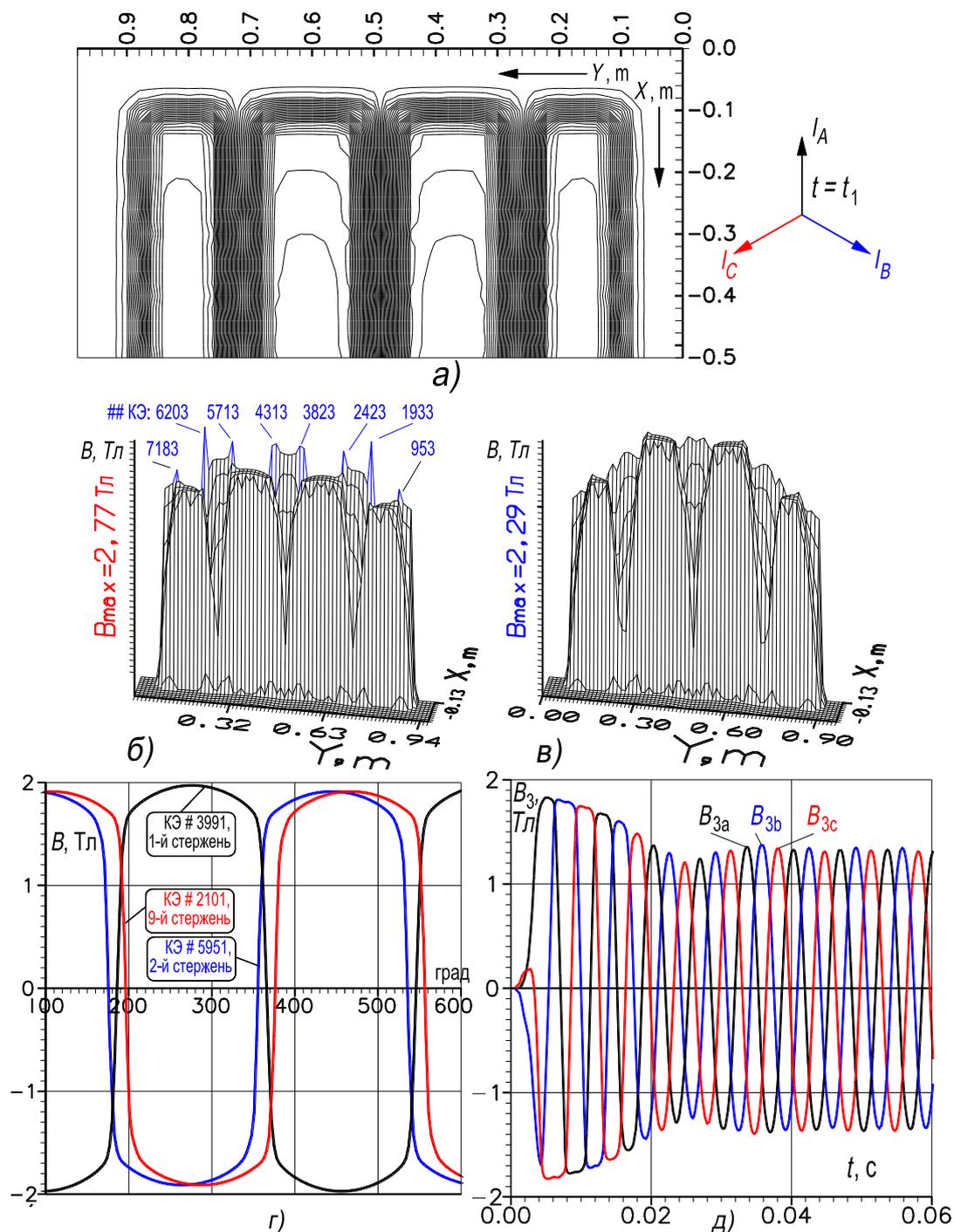


Рис. 2. Результаты расчёта магнитного поля:
 а) – картина поля; б), в) – пространственное распределение индукции; г) – кривые индукции в стержнях;
 д) – кривые третьей трёхфазной гармоники индукции

Получены результаты: 1) установлено рациональное соотношение сечений ярм и стержня (0,52 – 0,55), что определяет снижение материалоемкости (рис. 2,а); 2) предложено заполнять углы окон магнитопровода магнитным материалом (рис. 1,в и 2,а,б,в) для снижения потерь; 3) определены значения амплитуд гармоник индукции в магнитопроводе (рис. 2,г,д) и в зонах рассеяния и вытеснения потока (рис. 2,а), используемые для проектирования утроителя частоты.

Библиографический список

1. Забудский, Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов / Е.И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2018. – 355 с.

УДК 621.313.04

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ТЕХНОЛОГИИ СОВМЕЩЕННЫХ ОБМОТОК

Забудский Евгений Иванович, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени И.Ф.Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Бычков Сергей Александрович, аспирант кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени И.Ф.Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Аннотация. В статье приведены результаты сравнительных испытаний двигателей со стандартными и совмещенными обмотками, произведен расчет экономического эффекта от повсеместной модернизации асинхронных электрических машин на территории г. Москвы по технологии совмещенных обмоток.

Ключевые слова: энергосбережение, совмещённая обмотка, асинхронный электродвигатель, энергоэффективность, технология, модернизация.

Технология совмещенных обмоток представляет собой систему обмотки электрической машины, которая состоит из двух комплектов катушек: один комплект соединён по схеме «звезда», а другой по схеме «треугольник», между собой «звезда» и «треугольник» соединены параллельно (рис. 1). На практике также используются и другие схемы совмещённых обмоток [1-3].

Проведенные сравнительные испытания двигателя АИР100L6 заводского исполнения (ОК-2), и этого же двигателя, модернизированного по технологии совмещенных обмоток (ОКм-7), показали увеличение

минимального, пускового и максимального моментов на 31,4% в пользу ОКм-7 (рис. 2). Также отмечается повышение энергоэффективности двигателя с класса IE2 до IE4, кроме того, модернизация двигателя позволила получить КПД, близкий к номинальному значению в более широком диапазоне нагрузок (от 0,3 до 1,4 номинальной) [2].

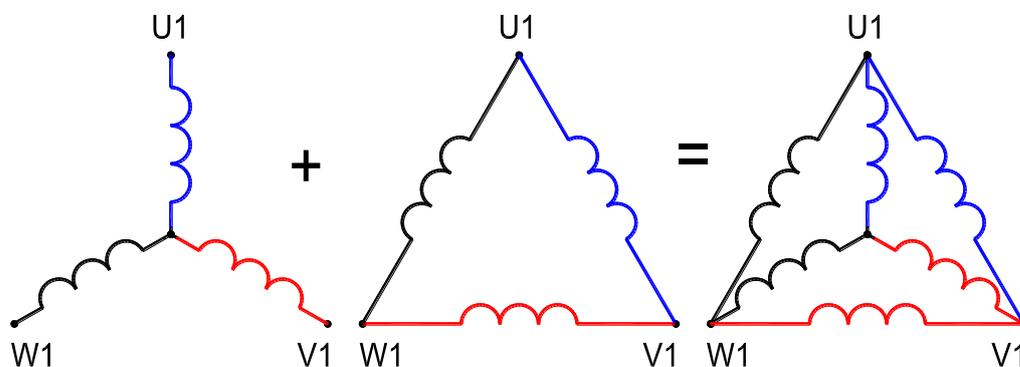


Рис. 1. Схемы соединения обмоток электрических машин

Полученные характеристики достигнуты без увеличения материалоемкости, трудоемкости и без изменения существующих технологий производства и ремонта электродвигателей. Перепроектирование магнитной системы двигателя под совмещенные обмотки позволит получить более выраженный положительный эффект.

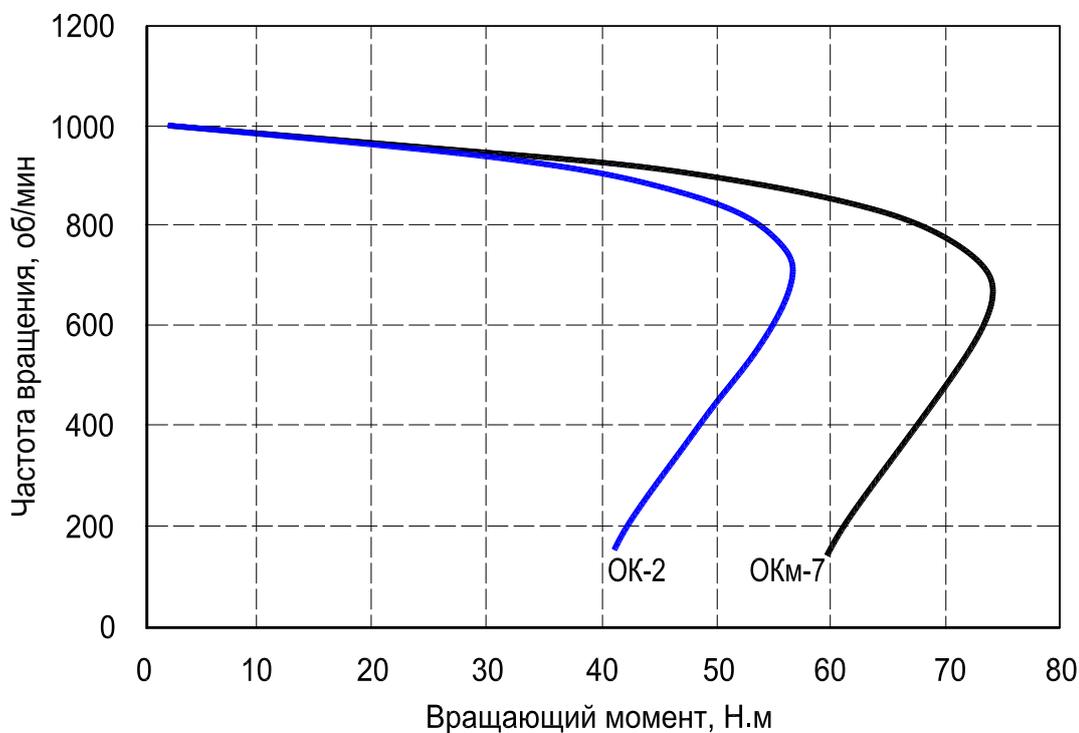


Рис. 2. Графики механических характеристик двигателя типа АИР-100L-6, ОК-2, ОКм-7

Проведем экономическое обоснование модернизации асинхронных электрических машин по технологии совмещенных обмоток.

Известно, что основным потребителем мировой выработанной электроэнергии являются асинхронные электродвигатели (в России на долю АД приходится около 50% выработанной электроэнергии), а средняя загрузка электродвигателя в отечественной промышленности составляет 0,3 – 0,4. Такой низкий коэффициент загрузки электродвигателей в промышленности обусловлен неправильным подбором двигателей для конкретных технологических процессов. До недавнего времени в России не предпринимались действия в направлении экономии энергоресурсов, поэтому двигатели подбирались с запасом по мощности, что приводило к таким последствиям как: работа двигателя с КПД значительно ниже номинального; избыточный напор в гидравлических сетях и т.п.

В отличие от стандартных, двигатели с совмещенными обмотками имеют лучшие механические характеристики и энергетические показатели, что позволяет экономить от 15 – 40% потребления электроэнергии при выполнении той же полезной работы. Наибольший экономический эффект достигается в системах с переменным характером нагрузки, таких как: системы холодного водоснабжения, автотранспортные системы и т.д. [4].

Рассчитаем экономический эффект от повсеместной модернизации асинхронных электрических машин по технологии совмещенных обмоток в г. Москве с учетом тарифа на электроэнергию согласно приказу Федеральной службы по тарифам от 11 октября 2019 года № 1338/19.

По данным Росстат, потребление электроэнергии в 2019 году в Москве составило 56,6 млрд. кВт·ч, следовательно на асинхронные двигатели пришлось $W_{АД} = 28,3$ млрд. кВт·ч. Минимальный уровень тарифа по Москве, равен $T_{ЭЭ} = 4,37$ руб/кВт·ч (без НДС).

Экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_{\Delta} = W_{АД} \cdot \mathcal{E}_{ЭЭ} \cdot T_{ЭЭ}, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_{Δ} – экономический эффект, млрд. руб/год;

$W_{АД}$ – годовое потребление электроэнергии АД, млрд. кВт·ч;

$\mathcal{E}_{ЭЭ}$ – средняя экономия электроэнергии при замене стандартных обмоток на совмещенные;

$T_{ЭЭ}$ – минимальный тариф на электроэнергию в Москве, руб/кВт·ч.

$$\mathcal{E}_{\Delta} = 28,3 \cdot 0,3 \cdot 4,37 = 37,1 \text{ млрд. руб/год.} \quad (2)$$

Таким образом, экономический эффект от повсеместного внедрения технологии совмещенных обмоток составит 37,1 млрд. руб/год. Кроме этого, можно сделать вывод, что применение данной технологии позволит сохранить огромное количество ископаемого топлива, тем самым снизить негативное влияние на экологию в целом.

Библиографический список

1. Теплова, Я.О. Модернизация асинхронных машин / Я.О. Теплова [и др.] // Изобретатель и рационализатор. – 2018. – № 4. – С. 22-25.
2. Бычков, С.А. Энергоэффективная система электропривода ведущих колес трактора 0,2 тягового класса: дипл. работа (диссертация магистра электроэнергетики и электротехники). ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева – Москва: 2020. – 125 с.
3. Забудский, Е.И. Электрические машины. В 4-х частях: Учебное пособие для вузов [Текст]: Часть 2. Асинхронные машины / Е.И. Забудский – Москва: ООО «Мегаполис», 2017. – 304 с. (color). URL-адрес – http://zabudsky.ru/AD_UP2/1-2_UP2-AD_T.pdf.
4. Дуюнов, Д.А. Совмещенные обмотки электрических машин [Текст] / Е.Д. Дуюнов, Д.А. Дуюнов – Зеленоград: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2018. – 245 с.